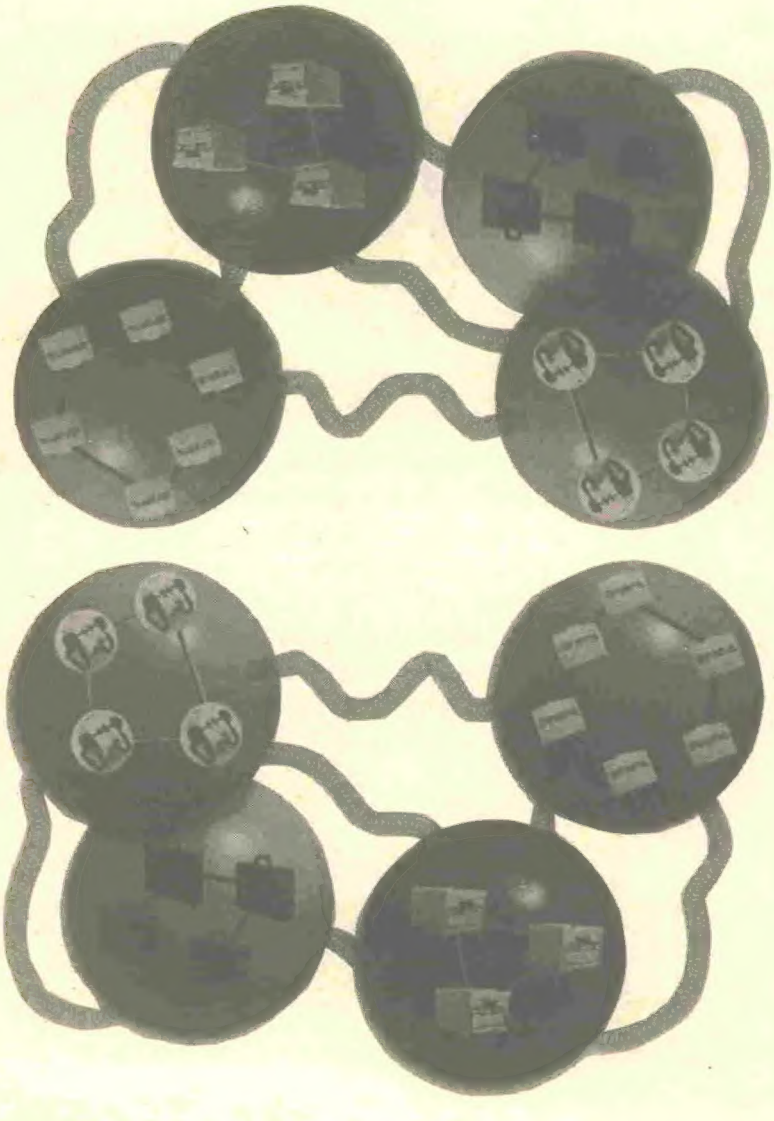
สหัส พรหมสิทธิ์

คอมพิวเตอร์แบบเร็วสุด ที่ประกอบจากโมเลกุล

การค้นคว้าวิจัยเพื่อหาทางใช้ประโยชน์จากโลกของอนุภาค เช่น โมเลกุล ในการสร้างคอมพิวเตอร์สำหรับอนาคต



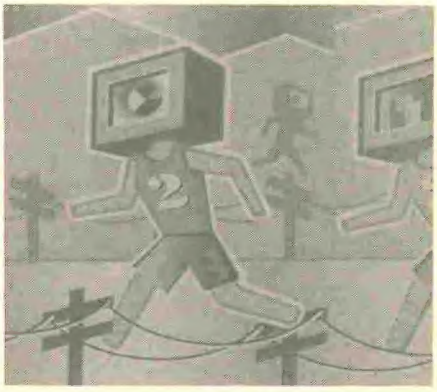
ข้อคิดในโลกของคอมพิวเตอร์เทคโนโลยีน่าจะอยู่บนพื้นฐานของความจริงข้อหนึ่งที่ว่า ความมีประสิทธิภาพของส่วนประกอบที่สำคัญมักแปรไปในทางตรงข้ามกับขนาด ดังเช่นกรณีของวงจรไอซีที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ ซึ่งการออกแบบชิพที่ทันสมัยที่สุดในปัจจุบันจะสามารถทำได้แค่เพียงบรรจุทรานซิสเตอร์ลงไปในชิพได้ไม่เกิน 10 ล้านตัว จนกระทั่งสักวันหนึ่งในอนาคตอันใกล้ก็อาจมีชิพที่มีทรานซิสเตอร์ราว 1 พันล้านตัวบรรจุอยู่ในนั้น พร้อมด้วยราคาค่างวดของโรงงานผลิตชิพที่อาจสูงถึง 5 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ต่อหนึ่งโรงงาน อันหมายถึงการนำเอาอุปกรณ์เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตชิพรุ่นก่อนมาปรับปรุงซ่อมแซมเพื่อนำมาใช้ใหม่ มิเช่นนั้นราคาของโรงงานก็อาจสูงถึง 10,000 ล้านเหรียญ ในกรณีที่ใช้อุปกรณ์ในการผลิตใหม่ทั้งหมด

อันนี้ก็เป็นเรื่องของการผลิตชิพในอนาคต ส่วนราคาของโรงงานในปัจจุบันจะตกราว 2.5 พันล้านเหรียญสหรัฐฯ ต่อหนึ่งโรงงาน เช่นกรณีของ Intel อันจะเกี่ยวข้องกับกฎของมัวร์ (Moore's Law) ที่ว่า ความสามารถในการประมวลผลข้อมูลจะเพิ่มเป็นสองเท่าในทุก 18 เดือน ซึ่งเป็นกฎที่ยอมรับในวงการเซมิคอนดักเตอร์ (เช่น Silicon Valley) มานานถึง 30 ปี แต่ความจริงของกฎข้อนี้จะเป็นอย่างไรต่อไปนั้นไม่มีใครทราบ อย่างไรก็ตาม ก็ได้เกิดมีกฎข้อที่สองของมัวร์ที่คนอื่นเป็นผู้สังเกต นั่นก็คือว่า ค่าใช้จ่ายสำหรับโรงงานที่ใช้ในการผลิตชิพจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในทุก generation

ที่พูดมาทั้งหมดนี้ก็จะเกี่ยวกับสาเหตุที่ว่าทำไมนักวิศวกรคอมพิวเตอร์และนักวิทยาศาสตร์จึงต้องพยายามหากรรมวิธีต่าง ๆ ในการผลิตชิ้นส่วนของคอมพิวเตอร์ให้มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ จนถึงในระดับโมเลกุล โดยพยายามไม่ใช้สารที่เรียกว่า ซิลิคอน (silicon) หรือวัสดุอื่นใดก็ตามที่จะมีผลในเรื่องของขนาด ค่าใช้จ่าย และประสิทธิภาพ อันทำให้มีการค้นคว้าวิจัยเพื่อหาทางใช้ประโยชน์จากโลกของอนุภาคเช่นโมเลกุลในการสร้างคอมพิวเตอร์สำหรับอนาคต

การผนึกแน่นในระดับโมเลกุล

คอมพิวเตอร์ในอนาคตที่สร้างจากโมเลกุลในแง่ของการซ้อนเรียงกันทีละโมเลกุลโดยไม่ได้อาศัยก้อนวัสดุซิลิคอนที่ขนาดใหญ่เทอะทะเหมือนที่เป็นอยู่ในปัจจุบันนั้น เมื่อนำมาเปรียบเทียบสัดส่วนกันในขณะที่นำมาใช้งานก็จะทำให้คอมพิวเตอร์เช่นแบบบนโต๊ะกลายเป็นยักษ์ในทันทีเมื่อนำโมเลกิวล่าร์คอมพิวเตอร์ที่มีขนาดเท่าลูกเต๋ามาวางเทียบงานอันเป็นส่วนสำคัญในการสร้างคอมพิวเตอร์จากโมเลกุลนี้จึงต้องพึ่งพานักวิจัยที่เป็นนักเคมีอย่างเลี่ยงไม่ได้ อนาคตของการทำให้อุปกรณ์คำนวณมีขนาดเล็กมาก ๆ (ultra miniaturised future) จึงน่าจะต้องอาศัยนักเคมีเป็นด่านหน้า โดยเริ่มต้นการสร้างองค์ประกอบที่ถือว่าเป็นพื้นฐานที่สุดเป็นอันดับแรก เส้นไย (wire) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่จะทำงานร่วมกับโมเลกุลหนึ่งตัว โดยโมเลกุลดังกล่าวจะทำหน้าที่เป็นสวิตช์ที่เปิดปิดได้ (on-off molecular switch) ความเรียบง่ายของสวิตช์ทางคำนวณแบบนี้จึงเป็นเหมือนภาพลวงตา เพราะก่อนที่จะมาถึงการสร้างสวิตช์ง่าย ๆ แบบนี้จนเป็นผลสำเร็จหรือเป็นรูปเป็นร่างได้ก็ต้องผ่านขั้นตอนทางเคมีอันแสนจะยุ่งยากซับซ้อน รวมทั้งต้องใช้เวลาในการค้นคว้าวิจัยเป็นแรมปีจึงเริ่มเห็นฝั่ง



การสร้างคอมพิวเตอร์ในระดับโมเลกุลจึงเป็นความท้าทายอันแสนยากที่นอกจากอาศัยปรมาจารย์ด้านเคมีแล้ว ยังต้องมีผู้เชี่ยวชาญด้านอื่นเข้าช่วยชนิดเป็นทีม เมื่อการค้นคว้ารุดหน้าไปจนถึงการประกอบเป็นคอมพิวเตอร์ที่ต้องมีอุปกรณ์อันเป็นกลไกต่าง ๆ มาให้การสนับสนุนก่อนที่จะเป็นคอมพิวเตอร์ที่สมบูรณ์แบบและมีขนาดเล็กที่สุด ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ในยุคต่อไปจึงอาจหนีไม่พ้นโมเลกิวล่าร์คอมพิวเตอร์ (Molecular Computer) ที่มีขนาดเล็กกะทัดรัดจนเหลือเชื่อ อันเป็นผลมาจากการให้ความสนใจในการวิจัยขั้นพื้นฐานนับตั้งแต่ภาควิชาเคมี ฟิสิกส์ จนถึงศาสตร์แขนงอื่นที่เกี่ยวข้อง

สิ่งที่น่าสังเกตอย่างหนึ่งก็คือว่า ก่อนจะมาถึงยุคของโมเลกิวล่าร์คอมพิวเตอร์นั้น ได้มีผู้อาศัย**หลักของการผนึกแน่น**ของวงจรต่าง ๆ ไปออกแบบซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้วงจรไอซี ดังเช่นกรณีของปรมาจารย์ซีมัวร์ เครย์ (Seymour Cray) ซึ่งได้เสียชีวิตไปเมื่อไม่นานมานี้ คำว่าผนึกแน่นในทัศนะของเครย์นั้นหมายถึงการพยายามทำให้องค์ประกอบทุกส่วนที่มีผลกับความเร็วในการคำนวณให้มาเบียดเสียดอยู่ใกล้กันให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ได้ความเร็วในการคำนวณหรือการประมวลผลสูงสุด ดังจะเห็นได้จากโครงร่างของซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ที่เครย์เป็นผู้ออกแบบว่าไม่เหมือนใคร เพราะมีรูปเป็นทรงกระบอก (cylindrical appearance) ที่ต้องการให้ทุกอย่างอยู่อย่างใกล้ชิดกันที่สุด โดยไม่เกรงปัญหาในเรื่องของความร้อนที่จะตามมา เพราะสามารถใช้ระบบทำความเย็นเข้าช่วยเพื่อเป็นการแก้ปัญหานี้

ความคิดในเรื่องของการผนึกแน่นของซีมัวร์ เครย์จึงเป็นความคิดที่อยู่ในระดับมหาภาคที่ยังคงต้องเกี่ยวข้องกับชิ้นส่วนที่เป็นวงจรซึ่งยังมีขนาดค่อนข้างใหญ่ เพราะการออกแบบของเครย์มักต้องการความแน่นอนในทางคำนวณและความเชื่อใจในการใช้งานที่ทำให้ปรมาจารย์ผู้นี้เลือกใช้วงจรหรือชิพที่สำเร็จรูป ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในวงการคอมพิวเตอร์ การผนึกแน่นเพื่อให้เกิดความเร็วสูงเช่นกรณีของเครย์ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์จึงเป็นการผนึกแน่นที่เอาของที่มีขนาดใหญ่มารวมเข้าด้วยกัน ที่มีมาไม่ต่ำกว่าสองทศวรรษจนปัจจุบัน แต่ก็ไม่มีการผนึกแน่นอันใดที่จะมีประสิทธิภาพในทางคำนวณสูงเท่าการนำสิ่งที่เล็กจนแทบมองไม่เห็นในระดับอนุภาคมาวางเรียงเข้าด้วยกันในรูปของปิรามิดหรือรูปทรงอื่น ๆ และอนุภาคที่เล็กที่สุดเท่าที่มนุษย์จะทำได้ในขณะนี้ก็คือโมเลกุล ระดับของการผนึกแน่นในขั้นโมเลกุลจึงย่อมต้องมีประสิทธิภาพในทางคำนวณสูงกว่าการใช้ของใหญ่ ๆ เช่น ชิพมาผนึกแน่นโดยไม่ต้องสงสัย ผลที่ตามมาที่ถือว่าเป็นเรื่องเอกอุก็คือนอกจากโมเลกิวล่าร์คอมพิวเตอร์จะให้ความเร็วในการคำนวณสูงแบบสายฟ้าแล้ว ยังตัดปัญหาในเรื่องการใช้พลังงานไฟฟ้าให้ลดลงได้มากมายหลายพันเท่า เมื่อเทียบกับคอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วสูงสุดในปัจจุบัน อันเป็นสาเหตุสำคัญว่าทำไมแนวความคิดในการออกแบบคอมพิวเตอร์ในยุคต่อ ๆ ไปจึงต้องมุ่งมองไปในระดับปรมาณูหรือโมเลกุล

จากนี้ก็จะขอเข้าสู่เรื่องราวของการค้นคว้าวิจัยที่สร้างอุปกรณ์ในระดับโมเลกุลของสถาบันอันเป็นมหาวิทยาลัย ว่าในปัจจุบันได้ก้าวไปถึงไหน โดยจะเริ่มจากมหาวิทยาลัยซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วไปในเรื่องของคุณภาพของงานค้นคว้าวิจัยโดยเฉพาะในด้านคอมพิวเตอร์ศาสตร์และวิทยาศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนการพัฒนาคอมพิวเตอร์ให้มีความเร็วสูงและมีประสิทธิภาพ (เช่นการประหยัดพลังงานไฟฟ้า ฯลฯ)

สวิตช์ในระดับโมเลกุล

งานวิจัยอันแรกที่จะขอพูดถึงก็คือ การพัฒนาอุปกรณ์ที่มีความเร็วในระดับโมเลกุล (molecular devices) อันเป็นการวิจัยร่วมกันระหว่างมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียที่ริเวอร์ไซด์กับมหาวิทยาลัยคาร์เนกิเมลลอนในสหรัฐฯ หน้าที่ของ molecular devices อันนี้ก็คือพาหะในการส่งถ่ายพลังงานที่เกิดจากโฟตอน (photons) ที่อยู่ในแสงสว่างโดยไม่มีการเกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนในด้านไฟฟ้าแต่อย่างใด ผู้วิจัยเรื่องนี้ก็คือเดวิด โบเซียน (ม.แคลิฟอร์เนีย) กับโจนาธาน ลินด์เซย์ (ม.คาร์เนกิฯ) ซึ่งได้ให้ความเห็นว่าการทำงานในระดับที่เป็นโมเลกุลแบบเดี่ยว (single molecules) นั้นการดูดกลืนและการเปล่งแสงจะตรวจวัดได้ง่ายกว่ากระแสไฟฟ้า อันหมายถึงว่าการส่งสัญญาณ (transmission signal) ด้วยแสงจะก่อให้เกิดความสัมพันธ์ต่อเนื่อง (ที่ดีกว่าการส่งสัญญาณด้วยพลังงานแบบอื่น) ระหว่างอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กมาก ๆ เช่นโมเลกุลกับโลกภายนอก

ในปี 1994 นักเคมีได้ประดิษฐ์สายใยสำหรับนำแสงที่เรียกว่าโฟโตนิกไวร์ (photonic wire) ซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม (chain) ของโมเลกุลที่เรียกว่าปอร์ไฟริน (porphyrins) อันเป็นโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นวงแหวนขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยไนโตรเจนเป็นจำนวน 4 ปรมาณู (หรืออะตอม) ซึ่งสามารถจับคู่กับอะตอมอื่น ๆ ได้ในรูปของการให้มาอยู่ตรงศูนย์กลางของวงแหวน ปอร์ไฟรินที่อยู่ตรงปลายหนึ่งของสายใยนำแสง (wire) จะทำหน้าที่ดูดซับแสงจากนั้นก็เข้าสู่ภาวะที่เรียกว่า excited state จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งก็จะมีการถ่ายทอดพลังงานส่วนเกินให้กับปอร์ไฟรินตัวถัดไปในกลุ่ม กรรมวิธีเช่นนี้จะทำให้มีการส่งพลังงานให้ผ่านไปในกลุ่มหรือเชน (chain) จนถึงปอร์ไฟรินตัวสุดท้ายที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานเคมีให้เป็นแสงเพื่อส่งออกไปภายนอก ส่วนวิธีการที่จะเพิ่มสวิตช์ (switch) เข้าไปในสายใยนำแสง (wire) ก็ทำได้ด้วยการเพิ่มปอร์ไฟรินเข้าไปอีกหนึ่งตัว โดยให้ยึดติดกับเชน โดยให้ปอร์ไฟรินตัวนี้แตกกิ่งออกไปจากเชนที่เป็น wire สั้น ๆ ที่ประกอบด้วยปอร์ไฟรินเพียง 3 ตัว ปอร์ไฟรินตัวสุดท้ายที่เพิ่มเข้าไปและกำหนดแตกแขนงออกไปจาก wire จะมีแมกนีเซียมอะตอมอยู่หนึ่งตัวติดอยู่ เมื่อนักเคมีทำการออกซิไดซ์แมกนีเซียมอะตอม ก็จะเป็นการปิดกั้นไม่ให้พลังงานวิ่งไปที่แมกนีเซียมปอร์ไฟริน ซึ่งจะก่อให้เกิดความร้อนอันเป็นผลตามมา ทำให้ไม่มีการส่งหรือปล่อยแสงออกมาภายนอก ในกรณีที่ต้องการให้เปล่งแสงออกมาก็ต้องใช้กระบวนการทางเคมีเพื่อลดปริมาณของแมกนีเซียม

จุดเด่นอันเนื่องมาจากการออกแบบสวิตช์สำหรับอุปกรณ์ระดับโมเลกุลที่พูดในข้างต้นก็คือ การไม่นำสวิตช์ไปวางไว้บนสายใยหรือ wire แต่ให้ทะแยงออกไปเหมือนกิ่งไม้ อันทำให้สามารถเพิ่มสวิตช์เข้าไปตามจุดต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก นอกจากนี้นักเคมียังได้พบวิธีที่จะทำให้สวิตช์ทำงานได้ทั้งในจุดที่อยู่กลางและด้านปลายของเส้นใยที่ประกอบด้วยปอร์ไฟรินเพียงสามตัว หน่วยที่มี wire และสวิตช์แบบง่าย ๆ ที่ได้กล่าวมานี้สามารถนำมาต่อเข้าด้วยกันได้หลายแบบหลายวิธีเพื่อให้ทำหน้าที่เหมือนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่าง ๆ รวมทั้งคอมพิวเตอร์ชิพอันเปรียบเหมือน Lego blocks ในทางเคมี งานขั้นต่อไปสำหรับนักเคมีเช่นโบเซียนและลินด์เซย์ก็คือ การทำให้สวิตช์ทำงานโดยอาศัยแสงมากระตุ้นแทนที่จะใช้ oxidant ทางเคมี

ทั้งหมดนี้ก็เป็นเรื่องของการรุดหน้าในการสร้างอุปกรณ์ระดับโมเลกุลในด้านโมเลกิวล่าร์สวิตช์ ในช่วงก่อนปี 1996 อันเป็นผลงานวิจัยของมหาวิทยาลัยแคลิฟอร์เนียที่ริเวอร์ไซด์และมหาวิทยาลัยคาร์เนกิเมลลอน ซึ่งอยู่ที่พิตสเบิร์กในสหรัฐฯ เรื่องที่จะพูดในข้อต่อไปคงหนีไม่พ้นพัฒนาการของสวิตช์ที่ทำงานได้เร็วมาก ๆ (Superfast switch) เพื่อให้เกิดการต่อเนื่องจากข้อนี้

คณิตศาสตร์กับคอมพิวเตอร์

น่ากล่าวได้ว่าหัวใจของการทำงานของคอมพิวเตอร์ รวมทั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าอีกมากมายหลายชนิดล้วนต้องเกี่ยวข้องกับกลไกที่เรียกว่าสวิตช์ (switch) จนแยกไม่ออก โดยเฉพาะในแง่ของการบังคับ (หรือควบคุม) สิ่งใดสิ่งหนึ่งหรือหลาย ๆ สิ่ง การค้นคว้าวิจัยในเรื่องของอุปกรณ์สวิตช์เช่นในโลกของคอมพิวเตอร์จึงเป็นสิ่งที่นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรให้ความสนใจตลอดมา อันเนื่องจากว่าการทำงานของสวิตช์จะมีความเกี่ยวข้องผูกพันกับการคำนวณหรือประสิทธิภาพความเร็วในการคำนวณ ถ้าจะมองย้อนไปในอดีตในโลกของอุปกรณ์สวิตช์หรือสวิตชิงที่ถือว่าเป็นโบราณมาก ๆ นั้นจะเห็นว่าการทำงานของสวิตช์เป็นแบบกึ่งกลกึ่งไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า electromechanical (เช่นระบบชุมสายโทรศัพท์ที่เป็นแบบ cross-bar) นั้นทำงานได้ช้าเพราะต้องพึ่งพาการเคลื่อนไหวทางกลหรือของชิ้นส่วนต่าง ๆ เมื่อหมดยุคของ electromechanical ก็เข้าสู่ยุคของสวิตช์ที่มีการเคลื่อนไหวที่ไม่ต้องผูกพันกับทางกล โดยให้อิเล็กตรอนหรือสิ่งที่เบามาก ๆ เป็นตัวเคลื่อนไหว อันนี้ก็เป็นเรื่องของฮาร์ดแวร์ สำหรับในแง่ของซอฟต์แวร์นั้นก็เริ่มจากระบบ electromechanical ที่ยังไม่มีโปรแกรมเข้ามาเกี่ยวข้องจนมาถึงจุดที่มีความเป็นอัตโนมัติอย่างเต็มที่ เพราะซอฟต์แวร์โปรแกรมได้เข้ามาแบกรับภาระ

หน้าที่หลาย ๆ อย่างที่มนุษย์ (หรือช่างเทคนิค) ต้องลงมือทำเอง โดยซอฟต์แวร์รับเอาไปทำแทนจนเกือบหมด

พัฒนาของซอฟต์แวร์ในด้านของสวิตช์นี้ได้ไปไกลจนถึงขั้นมีการนำวิทยาการในด้าน AI เข้าช่วยเพราะสามารถใช้ดุลยพินิจเหมือน ๆ กับมนุษย์ ที่สุดของการพัฒนาซอฟต์แวร์โปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของสวิตช์หรือของสรรพสิ่งต่าง ๆ คงหนี AI หรือศาสตร์ที่ล้ำลึกกว่า AI ไม่พ้น อันเนื่องจากความต้องการที่จะให้ซอฟต์แวร์โปรแกรมมีความชาญฉลาดในแง่ของการสามารถใช้ดุลยพินิจในการตัดสินใจแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก ๆ ได้อย่างมีสัมฤทธิ์ผลและอย่างรวดเร็ว ซึ่งต้องอาศัย**อัลกอริธึม** (algorithm) ที่มีอานุภาพเข้าช่วย การติดตามพัฒนาการในโลกของอัลกอริธึมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งยวดไม่แพ้เรื่องอื่น ๆ เพราะมีการรุดหน้าไปเร็วมาก อันเนื่องจากว่าการแก้ปัญหาในโลกของความเป็นจริงนั้นเป็นเรื่องที่มีความยากและซับซ้อนโดยเฉพาะในแง่ของการคำนวณ อันนี้เองที่ AI และอัลกอริธึมที่ประเสริฐสุดจะเข้ามาเอาชนะได้ ในโลกอันกว้างใหญ่ของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้จึงต้องการผู้รู้นับเป็นจำนวนมากมายหลายสาขา โดยเฉพาะในด้านคณิตศาสตร์อันเนื่องจากว่าพฤติภาพของสรรพสิ่งต่าง ๆ ในจักรวาลล้วนอยู่ภายใต้กติกาทางคณิตศาสตร์จนยากที่จะปฏิเสธ

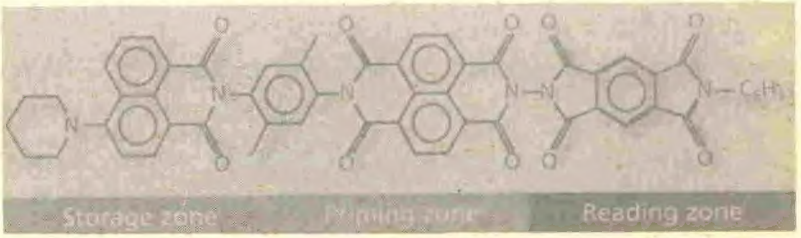
จากนี้ก็จะขอกลับเข้าสู่ที่เรื่องของการค้นคว้าวิจัยในด้านสวิตช์อีกแบบหนึ่งที่มีความเร็วสุด ๆ (super switch) สำหรับในปัจจุบันว่าได้ก้าวไปถึงไหนแล้ว

ซุปเปอร์สวิตช์ที่ Argonne National Lab

พัฒนาการในด้านซุปเปอร์สวิตช์ที่เร็วที่สุดสำหรับคอมพิวเตอร์ที่สร้างจากซิลิคอน (silicon-based) ในขณะนี้ยังคงใช้เวลาในการรีจิสเตอร์ข้อมูลนานนับเป็นหลาย ๆ นาโนวินาที (nanoseconds) รวมทั้งการทำงานของสวิตช์ที่ช้ากว่าหลายล้านเท่า เมื่อเทียบกับการเก็บข้อมูลในรูปของโมเลกุลเดี่ยว (single molecules) ที่สามารถส่งสัญญาณได้เร็วถึงในระดับ femtoseconds (10^{-15} วินาที) อันหมายถึงการรุดหน้าที่มีความสำคัญในแง่ของพละกำลังในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ที่ไม่ควรมองข้าม ซึ่งต้องขออธิบายเพิ่มเติมว่า เมื่อเร็ว ๆ นี้ (ก่อนกันยายน 1996) ได้มีการประกวดประชันกันในเรื่องที่ว่า สวิตช์ในระดับอนุภาคของนักวิจัยกลุ่มไหนจะทำงานเร็วกว่ากัน อันเป็นการดูจากสถานภาพที่ยังอยู่ในขั้นทดลอง (experimental systems) เท่านั้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วห้องทดลองส่วนใหญ่ก็สามารถประดิษฐ์ของตนให้ทำงานได้เร็วแค่ในระดับ 10^{-12} ของวินาที แต่ระบบที่ไมเคิล วาซิลูสกี้ (Michael Wasielewski) และทีมงานของเขาเป็นผู้สร้าง สามารถทำงานได้เร็วกว่านับเป็นพันเท่า โดยได้ทำการทดลองที่ Argonne National Lab ในอิลินอยส์ ความเร็วที่ว่านี้ก็คือในระดับ 10^{-15} วินาที หรือ femtoseconds ดังกล่าวแต่แรก

ระบบของไมเคิลและคณะจะทำงานโดยการปั๊มอิเล็กตรอนตัวหนึ่งให้วิ่งผ่านโมเลกุลหนึ่งตัว โดยอาศัยการส่องแสงเลเซอร์แบบสองจังหวะ (two pulses) อันนับเป็นครั้งแรกที่นักวิจัยสามารถควบคุมการทำงานของสิ่งที่เรียกว่า charge shift device โดยอาศัยช่วงเวลาที่สั้นมาก ๆ ที่เป็น femtoseconel รายละเอียดของระบบเช่นนี้มีว่า นักวิจัยสามารถที่จะเก็บข้อมูลแต่ละบิต (bit) เข้าไปในโมเลกุลโดยอาศัยอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียวในลักษณะของการเคลื่อนที่จากโซนหนึ่งไปยังอีกโซนหนึ่ง โดยอาศัยการส่องแสงเลเซอร์แบบเป็นจังหวะที่แยกกันทีละครั้ง

การปล่อยแสงเลเซอร์จังหวะแรกที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 416 นาโนมิเตอร์ (nanometers) จะไปดันอิเล็กตรอนจาก Storage zone ให้วิ่งไปที่โซนที่อยู่ตรงกลางซึ่งเรียกว่า Priming zone (รูปที่ 1) การปล่อยแสงเลเซอร์จังหวะที่สองที่มีความยาว 480 นาโนมิเตอร์จะมีผลให้อิเล็กตรอนต้องกระโดดเข้าไปในโซนสุดท้ายของโมเลกุลภายในเวลา 400 femtoseconds อันเป็นที่ซึ่งสำหรับไว้ให้อ่าน (รูปที่ 1) หรือที่เรียกว่า Reading zone วิธีที่จะทำให้สิ่งที่พูดมานี้เป็นไปได้ในการทดลองก็จำเป็นต้องนำอิเล็กตรอนมาป้อนเข้าไปในวงจรไฟฟ้าอันหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ถ้าหากสภาพรูปแบบของโมเลกุลยังไม่ได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น วิธีการดังกล่าวก็จะมีความเป็นไปได้ยาก เพราะภายในเวลาแค่เพียง 600 femtoseconds นั้นจะสั้นมากจนชนิดที่ว่ายังไม่ทันจะทำอะไร อิเล็กตรอนก็จะหวนกลับไปที่เดิมที่เรียกว่า Storage zone ซึ่งเป็นภาวะที่จะส่งคืนโมเลกุลให้กลับสู่สภาพที่มีเสถียรภาพมากที่สุด (maximum stability) แนวความคิดในการที่จะให้การทดลองเกิดความสำเร็จของวาซิลูสกี้ (Wasielewski) จึงได้อาศัยหลักในรูปของการดันให้อิเล็กตรอนมีสภาพเหมือนอยู่บนหน้าผาด้วยการใช้ขั้นตอนจำนวนสองขั้นตอน และเพื่อที่จะทำ "การอ่าน" ง่ายขึ้น วาซิลูสกี้ได้วางแผนที่จะเพิ่มอีกโซนหนึ่งเข้าไปในโมเลกุล (รูปที่ 1) โซนที่เพิ่มเข้าไปใหม่นี้จะทำหน้าที่จับอิเล็กตรอนที่อยู่ในบ่อ (well) พลังงานที่อยู่บนยอดผา อันเป็นการเพิ่มเวลาสำหรับที่จะทำให้การตรวจวัดตำแหน่งของอิเล็กตรอนมีมากขึ้น



รูปที่ 1

ในแง่ของทางปฏิบัตินั้นสิ่งที่พูดมาทั้งหมดนี้หมายถึงการที่วาซิลูสก็พยายามจะสร้างแนวปราการของโมเลกุลเพื่อให้ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็กที่สุด ซึ่งการที่จะทำเช่นนี้ได้ก็จะต้องทำการยึดโมเลกุลให้เข้ากับผิวของแก้วหรือโลหะที่จะทำหน้าที่ป้อนอิเล็กตรอนเข้าไปในวงจรไฟฟ้า

การทดลองของวาซิลูสก็ได้มีผู้ติดตามอยู่ทั่วโลกโดยเฉพาะในบรรดาห้องทดลองชั้นนำ เช่น applied optics group ของมหาวิทยาลัยเอดินเบิร์ก ซึ่งมีเดวิด แวส (David Vass) เป็นหัวหน้ากลุ่ม ซึ่งได้กล่าวสรรเสริญการทดลองของห้องทดลอง Argonne ว่าเป็นวิธีการที่หรูหราที่สุดในแง่ของฟิสิกส์ แต่คงต้องใช้เวลาอีกหลายปีกว่าจะมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เพราะต้องพึ่งพาการรุดหน้าของเลเซอร์เทคโนโลยี อันหมายถึงว่าการทำงานของแหล่งแสงจะต้องเร็วพอที่จะวิ่งไล่อิเล็กตรอนให้ทัน

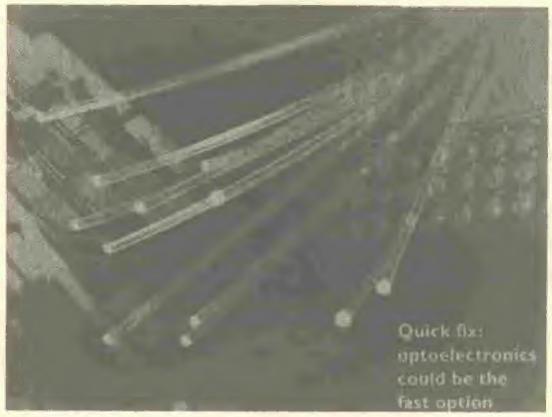
จากนี้ก็จะพาผู้อ่านไปพบกับความเล็กในโลกของควอนตัมที่นักวิทยาศาสตร์กำลังศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างควอนตัมที่เป็นคู่แฝดและคิดว่าจะสามารถนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ได้ในโลกของการสื่อสารด้วยควอนตัม รวมทั้งการคำนวณที่อาศัยหลักของควอนตัม

สัมพันธภาพในโลกของควอนตัม

ในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างคนสองคนที่อยู่ใกล้ชิดกันนั้น อีกฝ่ายอาจไม่มีทางหยั่งรู้ได้เลยว่าฝ่ายหนึ่งคิดอะไรอยู่ อันจะต่างจากโลกของควอนตัมที่ว่าการมาพบกันของอนุภาคควอนตัมจำนวนสองตัวในลักษณะคู่แฝดโดยแม้ว่าจะใช้เวลาอันสั้นก็สามารถเกิดความสัมพันธ์กันได้ในรูปของ mutual telepathic bond ที่มีความแนบแน่นเป็นพิเศษในแง่ที่ว่าในขณะก่อนที่จะมีการตรวจวัดสถานะ (state) นั้นอนุภาคทั้งสองยังอยู่ในสภาพที่ค่อนข้างสับสนจนไม่สามารถรู้สถานะที่แท้จริง แต่อนุภาคดังกล่าวก็ยังมีความสัมพันธ์อย่างแน่นแฟ้นคือ เมื่อมีการวัดสถานภาพของอนุภาคหนึ่งได้สำเร็จ ก็จะสามารถรู้สถานะของอีกอนุภาคได้ทันที แม้ว่าอนุภาคทั้งสองจะอยู่ไกลกันจนแลไม่เห็น พฤติภาพของอนุภาคทั้งสองตัวที่มีความสัมพันธ์กันเป็นพิเศษนี้ ในภาษาของควอนตัมฟิสิกส์ได้มีชื่อเรียกว่า entanglement หรือความสมานฉันท์ อันเป็นคำที่ตั้งขึ้นมาในทศวรรษที่ 1930 โดยนักฟิสิกส์ชาวเยอรมันผู้มีนามว่า **เออร์วิน ชโรดินเจอร์** (Erwin Schrodinger) ความมีสมานฉันท์ (entanglement) ของสองสิ่งเช่นที่พูดมานี้ไม่ได้จำกัดอยู่ที่ต้องเป็นอนุภาค (quantum particles) แต่อาจเป็นอิเล็กตรอนหรือโฟตอน (photons) ก็ได้ ในทางทฤษฎีถือว่า entanglement ก็คือสิ่งที่สามารถก่อให้เกิดการเชื่อมโยงสัมพันธ์กันอย่างแนบแน่นในระหว่างระบบควอนตัมใด ๆ ก็ตามที่ได้เคยสัมผัสเกี่ยวข้องกัน ในทางกายภาพหมายความว่าถ้าได้ทำการสอบวัดพฤติภาพของระบบหนึ่งก็จะมีผลกับอีกระบบหนึ่งหรือระบบอื่น แม้ว่าแต่ละระบบอยู่ห่างไกลกันมากก็ตาม

เรื่องราวของ entanglement จึงได้มีการพูดการวิจัยและถกเถียงกันมาเรื่อย ๆ ตั้งแต่อดีตจนปัจจุบัน ซึ่งนักวิทยาศาสตร์ได้มีความเข้าใจในเรื่องนี้อย่างค่อนข้างมากจนได้เวลาที่จะนำ "ผล" ของ entanglement มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในทางปฏิบัติได้ในโลกของการสื่อสารโทรคมนาคมและคอมพิวติง (quantum communication and quantum computing) ในปลายทศวรรษ 1980 จนสามารถนำความรู้ดังกล่าวมาใช้ในการสร้าง quantum logic gates ได้เมื่อปี 1996 อันถือว่าเป็นอุปกรณ์ขั้นพื้นฐานสำหรับควอนตัมคอมพิวเตอร์ รวมทั้งการเป็นทรานสมิทเตอร์ (transmitter) ที่สามารถเก็บแพร่ข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง โดยอาศัยโฟตอนเพียงตัวเดียว

ในโลกของ entanglement อิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมจะไม่มีตำแหน่งที่แน่นอน แต่จะเป็นไปในลักษณะตำแหน่งที่อยู่ที่เป็นไปได้ซึ่งมีอยู่หลายตำแหน่ง (locations) โดยที่แต่ละตำแหน่งจะถูกกำหนดด้วย**สถานะทางควอนตัม** (quantum state) สิ่งที่ดีที่สุดที่จะทำได้ในทางทฤษฎีก็คือ การแสดงความน่าจะเป็นว่าอิเล็กตรอนจะอยู่ในสถานะใดสถานะหนึ่งในจำนวนหลายสถานะที่เป็นไปได้ คือถ้าจะมองประเด็นที่พูดมานี้ในทัศนะของกลศาสตร์ของควอนตัมก็จะเป็นว่า อิเล็กตรอนไม่ได้อยู่ในที่เดียวแต่จะอยู่ในหลาย ๆ ที่พร้อมกัน (หรือในเวลาเดียวกัน) คือจะอยู่ในสถานะที่เรียกว่า superposition นอกจากนี้ยังเป็นการเปล่าประโยชน์ที่จะพยายามกำหนดตำแหน่งของอิเล็กตรอนจนกว่าจะมีการวัดเพื่อหาที่อยู่ของอนุภาคนี้ เมื่อถึงจุดนั้นการสอบวัดเพื่อหาตำแหน่งของอิเล็กตรอนจะทำลายคุณสมบัติที่เรียกว่า superposition และบังคับให้อนุภาคดังกล่าวต้องยึดตำแหน่งที่อยู่ที่แน่นอน อันเป็นการรุดหน้าทางทฤษฎีที่นักปราชญ์เช่นอัลเบิร์ต ไอน์สไตน์ไม่เห็นด้วย แต่นักฟิสิกส์รุ่นหลังเช่นนีลส์ บอร์ (Niels Bohr) ได้ยอมรับว่า entanglement เป็นความจริงที่ต้องยอมรับ ที่สำคัญก็คือว่านักปราชญ์เช่นไอน์สไตน์ก็มีสิทธิ์ที่จะเข้าไม่ถึงปรากฏการณ์บางอย่างที่ค่อนข้างล้ำยุคล้ำสมัยเช่นกรณี



รูปที่ 2
เลเซอร์เทคโนโลยีที่จำเป็นสำหรับการทดลองในด้านคณิตศาสตร์ของอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronics) ดังเช่นกรณีของการทดลองที่ Argonne National Lap. ในสหรัฐฯ

ของ entanglement ซึ่งในเวลาต่อมาก็ได้มีการพิสูจน์ว่ามีอยู่จริงและสามารถที่จะนำความเป็น entangled มาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ (ดังประจักษ์พยานที่ปรากฏในปลายทศวรรษ 1980) แม้ว่านักวิทยาศาสตร์จะยังไม่รู้อย่างลึกซึ้งว่า entanglement ของอนุภาคนั้นมีกลไกความเป็นมาอย่างไร

การค้นคว้าวิจัยส่วนใหญ่ที่มุ่งใช้ประโยชน์จาก entanglement นั้นอยู่บนพื้นความคิดประการเดียว นั่นก็คือควอนตัมคอมพิวติง เช่น Paul Benioff แห่ง Argonne National Lab ที่ได้คิดหาวิธีสร้างคอมพิวเตอร์ที่สามารถทำงานในระดับควอนตัมโดยอาศัยคุณสมบัติในเรื่องของ entanglement โดยมีผู้ค้นคว้ารายอื่น ๆ ที่สนใจในเรื่องเดียวกันนี้คือ Charles Bennett แห่ง IBM และ David Deutsch แห่งมหาวิทยาลัยอ็อกฟอร์ด ปี 1994 เป็นปีที่มีความสำคัญมากที่สุดปีหนึ่งในเรื่องของการบุกเบิกในด้านควอนตัมคอมพิวเตอร์ เพราะได้มีนักวิทยาศาสตร์ผู้มีนามว่า Peter Shor แห่ง AT&T Bell Lab ที่ประกาศอัลกอริธึมอันแรกสำหรับควอนตัมคอมพิวเตอร์ อันเป็นอัลกอริธึมที่สามารถแยกแฟกเตอร์ของตัวเลขที่ใหญ่มาก ๆ ได้ภายในเวลาไม่กี่วินาที ซึ่งจะเป็นเครื่องมือทางคำนวณที่หาค่ามิได้ที่ใช้สำหรับถอดรหัสที่ลับมาก ๆ ได้ในเวลานับเป็นวินาที บทความทางวิชาการของ Shor ที่ลงพิมพ์ในปี 1994 ได้ส่งผลอย่างกว้างไกลในด้านควอนตัมคอมพิวเตอร์ โดยทำให้นักวิจัยเป็นจำนวนหลายคนหันมาสนใจติดตามงานด้านนี้มากขึ้น

ควอนตัมคอมพิวติง

องค์ประกอบอันเป็นส่วนสำคัญของคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของ logic gates ที่ทำด้วยทรานซิสเตอร์และจะทำการคำนวณที่ซับซ้อนด้วยการปั๊มตัวเลขที่เป็น digits เข้าไปใน gate ชนิดต่าง ๆ ลักษณะอันเป็นจุดเด่นของควอนตัมคอมพิวเตอร์ก็คือ การประมวลผลในรูปของ superpositions ของ 1s กับ 0s ด้วยการแปลงข้อมูลที่ป้อนเข้าไปให้อยู่ในรูปของ superpositions แล้วทำการประมวลผลโดยอาศัย logic gates ผลที่ได้จะออกมาในรูปของ superposition ของคำตอบทุกอันมีความเป็นไปได้ที่เกิดจากการคำนวณ ควอนตัมคอมพิวเตอร์ตามนัยนี้จึงเป็นอุปกรณ์ที่ทำการคำนวณทุกอย่างแบบพร้อมกันไป อันเป็นการคำนวณในรูปของ quantum parallelism ทำให้เกิดปัญหาว่าในการอ่านผลของการคำนวณนั้นจำเป็นต้องมีการวัด ซึ่งจะทำลาย superposition กล่าวคือ ทุกบิตของข้อมูลจะถูกบังคับให้อยู่ในสถานะทางควอนตัมที่ตายตัว นั่นก็คือเป็น 1 หรือ 0 เมื่อเป็นเช่นนี้คำตอบหรือผลของการคำนวณที่มีความเป็นไปได้ที่ตรงข้ามเช่น 0 หรือ 1 ก็จะหายไป

เพื่อแก้ปัญหานี้ Shor ได้แนะนำว่าควรเปิดโอกาสให้เลขหกตัวใน final superposition สามารถปะปน (interfere) กันได้โดยยังอยู่อย่างครบถ้วนชนิดไม่ถูกตัดทอน จากนี้ก็สามารถอาศัยลำแสงสองลำในรูปของ interfering beams เพื่อสำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงของระยะทางที่มีความสั้นมาก ๆ อันจะก่อให้เกิดแพตเทอร์นของแบนด์ต่าง ๆ ที่สว่างและมืด ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อแนวความยาวของลำแสง (beam) อันใดอันหนึ่งเกิดการเปลี่ยนแปลง โดย Shor เชื่อว่าผลของการคำนวณที่เป็นแบบควอนตัมตามทัศนะของเขาจะปรากฏออกมาในลักษณะที่เหมือนกับ interference pattern ที่เขาเป็นผู้แนะนำ อัลกอริธึมของ Shor นั้นดีในทางทฤษฎี แต่ทำการทดสอบไม่ได้ เนื่องจากยังไม่มีเครื่องมือที่จะนำไปใช้ในการทดสอบ แต่ทุกอย่างก็กำลังจะเปลี่ยนไปในทางที่ดี เพราะนักวิทยาศาสตร์สามารถสร้างควอนตัมลอจิกเกต (quantum logic gate) ได้เป็นผลสำเร็จเมื่อปี 1996 อันเนื่องมาจากการรุดหน้าอย่างขนานใหญ่ในเรื่องของการบังคับควบคุมในโลกของควอนตัมที่ทำให้นักฟิสิกส์ในปัจจุบันสามารถบังคับลำแสงเลเซอร์ เพื่อทำให้อะตอมเย็นลง ดักอะตอมหรือไอออนให้อยู่ในที่ใดที่หนึ่ง รวมทั้งการทำให้เกิด single quantum state สำหรับอนุภาคต่าง ๆ

ทั้งหมดนี้เป็นพื้นฐานที่เป็นการพยายามอธิบายว่า ควอนตัมคอมพิวติงคืออะไร เพื่อเป็นรากฐานสำหรับไว้พูดในคราวต่อไป เนื่องจากว่ายังมีประเด็นต่าง ๆ ที่เป็นขั้นตอนของการค้นคว้าที่เกี่ยวกับเรื่องนี้ที่ต้องพูดถึงอีกมากก่อนที่จะก้าวไปถึงการมีคอมพิวเตอร์ที่เป็นแบบควอนตัมที่ใช้งานได้

การสื่อสารที่เป็นแบบควอนตัม

การรับส่งข้อมูลในระบบสื่อสารที่เป็นแบบดิจิตอลในปัจจุบันนั้นได้จำกัดอยู่ที่การส่งสัญญาณที่ประกอบด้วยเลข 0 หรือ 1 ทีละตัว แต่ในอนาคตอาจต้องมีการพัฒนาไปสู่การสื่อสารที่เป็นแบบควอนตัม (quantum communication) ที่นำเอาผลของ entanglement มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในแง่ของการส่งข้อมูลข่าวสารให้มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบดิจิตอล โดยอาศัยหลักที่ว่าอนุภาคเช่นอะตอมสามารถดำรงอยู่ในสถานะทางพลังงานที่มีอยู่สองสถานะ นั่นก็คือ low หรือ high energy state และได้มีการเสนอแนะในปี 1994 ว่าอนุภาคที่อยู่ในสองสถานะ (two state particle) นี้เมื่อนำมาทำให้อยู่ในสภาพที่เป็นสมาชิกของ entangled pair ได้ เมื่อใดก็อยู่ในวิสัยที่จะส่งข้อมูลให้เป็นแบบ 4 ดิจิตที่ต่าง ๆ กัน 0, 1, 2 และ 3 ในกรณีใช้ตัวเลขแบบไบนารีนั้นจะต้องอาศัย 8 บิตในการส่งหนึ่งคาแรกเตอร์จาก 256 คาแรกเตอร์ใน ASCII คอมพิวเตอร์โค้ด แต่สำหรับในกรณีของ entangled particle อันเป็นอนุภาคเดี่ยวที่สามารถรับข้อมูลได้หนึ่งในจำนวน 4 ดิจิต ก็จะใช้อนุภาคนี้เพียง 4 ตัวสำหรับงานเดียวกัน